شبیه‌سازی الگوی رسوب‌گذاری در بالادست سرریز نوک اردکی با به‌کارگیری صفحات مستغرق*

مهلا تجری[۱] امیر احمد دهقانی[۲] مهدی مفتاح‌هلقی[۳]

چکیده *سرریز نوک اردکی یکی از سازه‌های کنترل‌کننده سطح آب پرکاربرد در شبکه‌های آبیاری است. چنانچه رسوبات به داخل شبکه منتقل شود، در بالادست سرریز تله اندازی می‌شود و تراز سطح آب بالادست را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این تحقیق به‌صورت آزمایشگاهی از صفحات مستغرق جهت تخلیه رسوبات از طریق دریچه‌های واقع در دماغه و بال‌های جانبی سرریز استفاده‌شده است. همچنین از نرم‌افزار Flow-3D برای شبیه سازی الگوی جریان و رسوب استفاده گردید. نتایج نشان داد که به‌کارگیری صفحات مستغرق برای تخلیه رسوبات بخصوص در نسبت‌های هد آب به ارتفاع سرریز بیش‌تر از ۰/۳۳ بسیار مؤثر است. نتایج پردازش تصویر نشان داد که حداکثر خطای نسبی در شبیه‌سازی الگوی رسوب‌گذاری ۱۴/۴ درصد است.*

واژه‌های کلیدی الگوی رسوب‌گذاری، سرریز نوک اردکی، صفحات مستغرق، ضریب آبگذری، نرم‌افزار Flow-3D.

Simulation of Sedimentation Pattern in Upstream of Duckbill Weirs Using Submerged Vanes

Mahla Tajari Amir Ahmad Dehghani Mehdi Meftahhalaghi

Abstract *Duckbill weir is one of the water level control structures in irrigation networks. If Sediments are transferred into the irrigation networks, they trapped in the upstream of weir and effect on the upstream water level. In this study, submerged vanes are used for flushing the sediment to downstream in addition of gates. The Flow-3D software has been also used for simulation of flow and sediment pattern. The results showed that submerged vanes create secondary flow which is so effective for flushing the sediment especially in value of head over side wall to the weir height more than 0.33. The results of image processing showed that the maximum relatived error for simulation of sediment pattern is 14.4 percent.*

Key Words Sediment pattern, Duckbill weir, Submerged vanes, Discharge coefficient, Flow-3D Software.

* تاریخ دریافت مقاله ۹۶/۹/۱۲ و تاریخ پذیرش آن ۹۸/۸/۲۱ می‌باشد.

(۱) دانشجو کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

(۲) نویسندهٔ مسئول، دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان. **Email:** a.dehghani@gau.ac.ir

(۳) دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

مقدمه

سرریزها یکی از اجزای مهم شبکه‌های آبیاری و زهکشی و انتقال توزیع آب محسوب می‌شوند که با وجود ساده بودن ساختار و عملکرد آن، نقش مهمی در این شبکه‌ها ایفا می‌کنند و سطح آب را جهت آبگیری کانال‌های فرعی تنظیم کرده و دبی لازم جهت انتقال را فراهم می‌آورند. همچنین از این سازه‌ها به‌عنوان وسایل اندازه‌گیری دبی عبوری نیز استفاده می‌شود. یکی از سرریزهای پرکاربرد در کانال‌های آبیاری سرریز نوک اردکی است. سرریزهای نوک اردکی، به‌عنوان یک سازه تنظیمی و عبور دهنده جریان، به دلیل ویژگی آن در مقایسه با سایر سرریزها ازجمله کارایی بالاتر در عبور جریان به ازای واحد عرض کانال و تغییرات جزئی سطح آب در بالادست سازه که در اثر نوسانات جریان رخ می‌دهد، موردتوجه است. سرریز نوک اردکی طراحی ساده‌ای داشته و طول مؤثر بیش‌تری نسبت به سرریزهای لبه‌تیز معمول دارند، به‌این‌ترتیب می‌تواند دبی بیش‌تری در مقایسه با سرریزهای معمول برای کانال با عرض و ارتفاع آب مشابه، از خود عبور می‌دهد. با توجه به شباهت سرریزهای نوک اردکی و سرریزهای کنگره‌ای، عمده مطالعات در زمینه سرریز کنگره‌ای انجام‌شده است که در ادامه به آن‌ها پرداخته‌شده است.

در خصوص سرریزهای نوک اردکی و کنگره‌ای مطالعات زیادی تابه‌حال انجام‌شده است که ازجمله آن‌ها می‌توان به مطالعات کروستن [1]، شقاقیان و شریفی [2]، بیلهان و همکاران [3,4]، تجری و همکاران [5] و اژدری مقدم و جعفری ندوشن [٦] می‌توان اشاره نمود.

در طراحی شبکه‌های آبیاری و زهکشی توصیه می‌شود تا آب عاری از رسوبات وارد شبکه شود، لیکن در مناطق فرسایش پذیر ممکن است رسوباتی که منشأ آن‌ها آبرفتی و یا بادرفتی است وارد شبکه شده و در بالادست سرریزها تجمع پیدا می‌کنند. موسسه آموزش و تحقیقات آبیاری (ITRC,2007) توصیه نموده است که در دماغه سرریزهای نوک اردکی، دریچه‌ای برای تخلیه رسوبات در نظر گرفته شود.

ساکت [۷] تأثیر وجود روزنه در دماغه سرریز نوک اردکی مرکب لبه‌تیز بر ضریب آبگذری جریان به صورت آزمایشگاهی برر سی نمود و نتیجه‌گیری کرد که ضریب آبگذری تابعی از پارامترهای بی‌بعد موجود در رابطهٔ زیر است:

$$C_d = a\left(\frac{H}{H_u}\right)^b \left(\frac{H_w}{H_u}\right)^c \left(\frac{P_g}{H_u}\right)^d \left(\frac{L_w \sin\alpha}{W_2-W_1}\right)^e \qquad (۱)$$

که H هد آب روی بال جانبی سرریز، H_u هد آب بالادست سرریز، H_w هد آب روی سرریز مرکب، P_g بازشدگی روزنه، L_w طول سرریز مرکب، W_2 دهانه ابتدایی مدل، W_1 دماغه مدل، α زاویه بازشدگی (زاویه دیواره سرریز با امتداد جریان) است. هم‌چنین وی نتیجه گرفت با افزایش ارتفاع سرریز و نیز هد آب روی آن ضریب آبگذری جریان کاهش می‌یابد و با توجه به عملکرد خوب این نوع سرریز در هد کم آب می‌توان از آن‌ها در مواقع کم‌آبی استفاده کرد.

شفاعت‌طلب و همکاران [۸] به بررسی آزمایشگاهی تأثیر رسوب‌گذاری بر ضریب آبگذری جریان در سرریزهای کنگره‌ای پرداختند. مقایسه نتایج آن‌ها نشان داد که ترازهای رسوب‌گذاری ۳۰ و ٦۰ درصد ارتفاع سرریز، تأثیر معنی‌داری بر عملکرد سرریزهای کنگره‌ای ندارد ولی با افزایش تراز رسوب‌گذاری به ۹۰ درصد، ضریب آبگذری جریان در سرریزهای موردمطالعه به‌طور متوسط ۱۹ درصد کاهش می‌یابد. پورنعمت اللهی و همکاران [۹] به مطالعه آزمایشگاهی تأثیر توأم زبری و رسوب‌گذاری بر عملکرد هیدرولیکی سرریزهای استوانه‌ای در شرایط جریان آزاد پرداختند. نتایج حاصل از بررسی تأثیر زبری و ترازهای مختلف کف کانال بالادست بر ضریب دبی سرریز نشان داد که با افزایش زبری مقدار ضریب دبی سرریز به‌طور متوسط ۸ درصد کاهش و با افزایش تراز رسوب‌گذاری از صفر تا دوسوم ارتفاع سرریز، مقدار ضریب دبی سرریز ۳ درصد افزایش می‌یابد. همچنین در تراز رسوب‌گذاری دوسوم

ارتفاع سرریز افزایش زبری منجر به کاهش ۳ تا ۷ درصدی ضریب دبی سرریز می‌شود. بررسی نتایج حاکی از آن است که روند تغییرات فشار در طول سرریز در تراز رسوب‌گذاری دوسوم ارتفاع سرریز، مشابه با روند تغییرات آن در شرایط بدون رسوب است اما مقدار آن با افزایش سطح رسوب‌گذاری، کاهش می‌یابد. بهره‌بر و همکاران [۱۰] به مطالعه تأثیر بالا آمدن بستر بالادست سرریز اوجی به‌جای رسوبات بر نیمرخ سطح آب و ضریب دبی جریان پرداختند. نتایج نشان داد با بالا آمدن بستر پشت سرریز اوجی عمق آب و هد آب روی سرریز افزایش می‌یابد. تغییر هد آب باعث کاهش ضریب دبی سرریز می‌شود. به‌گونه‌ای که مقدار این پارامتر از ۲/۴۲ در حالت اولیه به ۱/۹۶ در حالت پر بودن مخزن کاهش‌یافته است.

دستورانی و نصرانی [۱۱] تأثیر ته‌نشینی رسوبات در پشت سرریز اوجی بر شرایط جریان با نسبت‌های مختلف شیب بالادست سرریز اوجی را موردبررسی قرار دادند. نتایج تحقیق ایشان نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع رسوبات، عمق آب و هد آب روی سرریز افزایش می‌یابد و ضریب آبگذری کاهش می‌یابد.

داود داودمقـامی و همکـاران [۱۲] تـأثیر رقوم بالادسـت و پایین‌دسـت روی ضـریب آبگذری سـرریز نوک اردکی لبه تیز به این نتیجه رسـیدند که تغییر در ارتفاع سـرریز نوک اردکی تأثیری بر میزان ضـریب آبگذری در نسبت‌های برابر $\frac{H}{P}$ (H هد آب روی سرریز و P ارتفاع سـرریز) ندارد. همچنین بالا آمدن قوم بسـتر در بالادست باعث کاهش ضریب آبگذری خواهد شد.

اودگن و همکاران [13] نیز اثرات رسـوب‌گذاری بر ضریب آبگذری سرریز مثلثی لبه تیز را موردبرر سی قرار دادند و به این نتیجه ر سیدند که ر سوب‌گذاری در بالادست سرریز تا ۱۰ درصد ضریب آبگذری سرریز را کاهش می‌دهد.

یکی از مسائل سرریزهای نوک اردکی، تجمع رسوب در بالادست آن‌ها و درنتیجه تأثیرگذاری بر تراز سطح آب بالادست و نوسانات آن است. این نوسانات مستقیماً بر روی ضریب دبی و آبگذری سرریز تأثیرگذار است و بهره‌برداری این نوع سرریزها را دچار مشکل می‌کند. برخی محققین پیشین برای رفع این مشکل قرار دهی دریچه در دماغه سرریز را پیشنهاد دادند ولی مشاهدات میدانی نشان می‌دهد که دریچه در دماغه سرریز در رسوب شویی رسوبات بالادست سرریز نقشی نداشته است و تنها می‌تواند به‌صورت موضعی رسوبات نزدیک دماغه را به پایین‌دست منتقل کند. تأثیر تجمع رسوب در بالادست سرریزها که موجب تغییر رقوم بالادست و پایین‌دست سرریز می‌شود در مطالعات محققینی که در بالا اشاره شد همچون پورنعمت اللهی و همکاران [۹]، دستورانی و نصرانی [۱۱]، داود داودمقامی و همکاران [۱۲] و اودگن و همکاران [13] نیز نتیجه‌گیری شده است.

در زمینه‌ی قرار دهی صفحات مستغرق در کانال‌ها برای تثبیت دیواره‌ها مطالعات بسیاری صورت گرفته است ازجمله: محققینی چون اودگارد و کندی [14]، اودگارد و لی [15] به بررسی کاربرد صفحات مستغرق در کانال‌های پیچان‌رودی برای تثبیت دیواره‌ها پرداختند. (ارتفاع صفحه به عمق آب) برابر ۰/۳۵، زاویه قرارگیری صفحات با جهت جریان برابر ۲۰ درجه را برای طراحی بهینه صفحات مستغرق پیشنهاد نمودند. کبیری سامانی [16] به بررسی تأثیر استفاده از صفحات مستغرق بر روی سرریزهای مایل پرداخت و نتیجه گرفت که به‌کارگیری صفحات مستغرق در حالت عمود بر سرریز، می‌تواند ضریب آبگذری را به میزان ۳۳ درصد افزایش دهد. بیگی‌پور و همکاران [17] به بررسی اثر فاصله صفحات مستغرق در دهانه آبگیر با زاویه مختلف صفحات برای کنترل رسوب ورودی به آبگیر در خم ۹۰ درجه و مسیر همگرا پرداختند و به این نتیجه رسیدند که برای یک زاویه ثابت صفحات مستغرق راندمان تقریباً ثابت است و وقتی فاصله افزایش یابد راندمان نیز افزایش می‌یابد. این اثر در نسبت‌های آبگیری بیش‌تر آشکار است. نسبت آبگیری ۱۵ درصد بیش‌ترین راندمان را در بین آزمایش‌ها آن‌ها داشت و هم‌چنین نتیجه‌گیری کردند با افزایش نسبت آبگیری راندمان صفحات در کنترل رسوبات

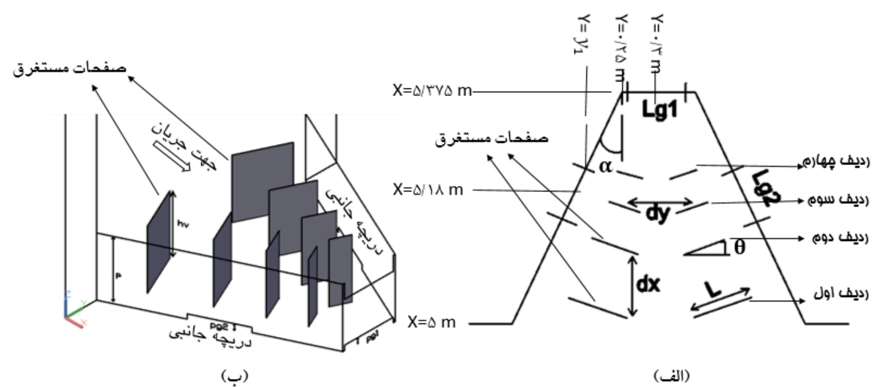
کاهش می‌یابد. مظلوم‌شهرکی و همکاران [18] به بررسی اثر صفحات مستغرق روی نسبت آبگیری و پروفیل سطح آب در زاویه‌ی انحراف ۵۵ درجه پرداختند. نتایج نشان داد که کاربرد به‌کارگیری صفحات مستغرق باعث افزایش تراز سطح آب نزدیک بالادست صفحات در مقایسه حالت بدون صفحه می‌شود. صفحات مستغرق باعث افزایش در نسبت آبگیری می‌شود. سرانجام نتایج نشان داد که صفحات مستغرق با زاویه ۳۰ درجه بهترین راندمان آبگیری دارد. منتصری و توکلی [۱۹] به شبیه-سازی میدان جریان حول تک صفحه مستغرق در لبه پایین‌دست و بالادست آبگیر جانبی واقع در کانال قوسی ۱۸۰ و تعیین اثر موقعیت‌های تک صفحه مستغرق نسبت به لبه‌های پایین‌دست و بالادست آبگیر و اثر زوایای مختلف صفحه بر الگوی جریان و الگوی تنش برشی بستر با مدل ریاضی Fluent پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که بهترین حالت قرارگیری صفحه در لبه پایین‌دست حالتی است که ابتدای صفحه دقیقه در مقابل لبه پایین‌دست آبگیر با زاویه‌ای در حدود ۲۵–۲۰ درجه قرار دارد و بهترین حالت قرارگیری صفحه در لبه بالادست حالتی است که انتهای صفحه دقیقاً در مقابل لبه بالادست آبگیر با زاویه‌ای حدود ۱۷ تا ۲۰ درجه قرار دارد.

نگاهی به سوابق تحقیق نشان می‌دهد که در خصوص کاربرد صفحات مستغرق در بالادست سرریز نوک اردکی برای کنترل رسوب در بالادست این سازه تحقیقی صورت نگرفته است. برای تأثیر به‌کارگیری صفحات بر انتقال رسوبات ابتدا لازم است به بررسی الگوی رسوب‌گذاری و جریان در بالادست سرریز در این حالت پرداخته شود. به همین دلیل در این تحقیق به بررسی آزمایشگاهی و شبیه‌سازی الگوی رسوب‌گذاری در بالادست سرریز نوک اردکی در حالت به‌کارگیری دریچه جانبی و صفحات مستغرق با نرم‌افزار Flow-3D پرداخته شد.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در فلومی به طول ۱۲ متر و عرض ۰/٦ متر انجام شد. در این پژوهش از ٤ مدل سرریز نوک اردکی که هر کدام دارای بازشدگی متفاوتی از دریچه جانبی بودند، استفاده شد. در شکل (۱) مشخصات هندسی مدل‌ها و صفحات مستغرق آورده شده است. در جدول (۱) مشخصات هندسی مدل‌ها و در جدول (۲) مشخصات هندسی صفحات آورده شده است. ارتفاع صفحات ٤ سانتی‌متری بر اساس توصیه اوگارد و کندی [14] و اوگارد و لی [15] به دست آمد و سایر ارتفاعات برای بررسی اثر افزایش ارتفاع صفحات بر الگوی رسوب‌گذاری در نظر گرفته شدند. همه‌ی مدل‌ها با زاویه بازشدگی (α) یکسان و ۲۵ درجه ساخته شدند. زاویه‌ی جهت جریان با صفحات مستغرق (θ) ۲۵، ارتفاع مدل‌ها (P) نیز یکسان و ۱۳ سانتی‌متر بود. ارتفاع دریچه در دماغه سرریز (P_{g_1}) ۱ سانتی‌متر و طول آن (L_{g_1}) ۱۰/۸ سانتی‌متر در همه‌ی مدل‌ها ثابت بود.

آزمایش‌ها در ٦ دبی برای ٤ بازشدگی متفاوت دریچه جانبی با ٤ ارتفاع متفاوت از صفحات مستغرق و انجام شد. بازه‌ی دبی جریان از ۰/۰۱ تا ۰/۰۳ مترمکعب بر ثانیه بود و برای این بازه دبی، عمق آب بالادست از ۰/۱٤ تا ۰/۲ متر بود. نسبت $\frac{H}{p}$ (H هد آب روی بالاهای جانبی سرریز و P ارتفاع سرریز است) در این آزمایش‌ها، ۰/۵–۰/۱ بود. وسیله‌ی اندازه‌گیری دبی و عمق جریان به ترتیب فلومتر با دقت ۰/۱ لیتر بر ثانیه و ترازسنج دیجیتالی بود. در تمامی آزمایش‌ها ۱/۸ کیلوگرم رسوب که درصد بیش‌تر ذرات از نوع ماسه بود، به ارتفاع ۱ سانتی‌متر در بالادست سرریز قرار می‌گرفت و بعد از به پایداری رسیدن الگوی رسوب‌گذاری در بالادست مدل (زمانی که انتقال رسوبات در دبی آزمایش متوقف می-شد)، رسوبات باقی‌مانده جمع‌آوری و بعد از خشک‌کردن آن‌ها در آون، توزین می‌شدند. درمجموع ۹٦ آزمایش و ۹٦ شبیه‌سازی، انجام شد. در شکل (۲) مدل آزمایشگاهی بکار رفته در تحقیق حاضر آورده شده است.



شکل ۱ مشخصات هندسی مدل ترکیبی سرریز–دریچه نوک اردکی: الف؛ نما پلان، ب؛ نما سه‌بعدی

جدول ۱ مشخصات هندسی مدل‌ها

نوع مدل	ارتفاع دریچه جانبی P_{g_2} (cm)	طول دریچه جانبی L_{g_2} (cm)
A	۱	۱۰/۸
B	۱/۷	۱۰/۸
C	۱	۵/٤
D	۱	۱٦/۲

جدول ۲ مشخصات هندسی صفحات مستغرق بکار رفته در تحقیق حاضر

شماره هر ردیف از صفحات	ارتفاع صفحات (cm)	طول صفحات L (cm)	فاصله عرضی d_y (cm)	فاصله طولی d_x (cm)
۱	٤,۷,۱۰,۱۳	۱۰/۲	۲۳	۱۰
۲	٤,۷,۱۰,۱۳	۸	۱۷/۵	۸/۱
۳	٤,۷,۱۰,۱۳	۵/۸	۱۳/۲	٦/٦
٤	٤,۷,۱۰,۱۳	۳/۸	۱۰/۱	



شکل ۲ مدل آزمایشگاهی بکار رفته در تحقیق حاضر

شبیه‌سازی کامپیوتری

برای شبیه‌سازی الگوی رسوب‌گذاری از نرم‌افزار Flow-3D ورژن ۱۱٫۲ و برای طراحی مدل‌ها و صفحات مستغرق از نرم‌افزار اتوکد ۲۰۱۷ استفاده شد. معادلات حاکم بر جریان تراکم ناپذیر سیال در نرم‌افزار Flow-3D، معادله پیوستگی و معادله مومنتوم متوسط‌گیری شده زمانی رینولدز است. نرم‌افزار Flow-3D این معادلات سه‌بعدی را روی شبکه محاسباتی حل می‌نماید و توانایی مدل کردن مسائل جریان‌های سطح آزاد و نمایش نتایج با قدرت گرافیکی بالا را دارا است. معادله پیوستگی در مختصات کارتزین به‌صورت قابل‌ارائه است:

$$\frac{V_F}{\rho c^2}\frac{\partial p}{\partial t}+\frac{\partial uA_x}{\partial x}+\frac{\partial vA_y}{\partial y}+\frac{\partial wA_z}{\partial z}=\frac{R_{SOR}}{\rho} \qquad (۲)$$

V_F کسر حجمی جریان، ρ دانسیته سیال، R_{SOR} منبع جرم، p فشار و c^2 توان دوم سرعت موج هستند. u، v و w اجزا سرعت و A_x،A_y و A_z کسرهای سطحی برای جریان در جهت x، y و z هستند. معادله مومنتوم در مختصات کارتزین و جهت x به‌صورت زیر است:

$$\frac{\partial u}{\partial t}+\frac{1}{V_F}\left\{uA_x\frac{\partial u}{\partial x}+vA_y\frac{\partial u}{\partial y}+wA_x\frac{\partial u}{\partial z}\right\}$$
$$=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}+G_x+f_x-b_x \qquad (۳)$$

در این معادله G_x شتاب بدنه، f_x شتاب ناشی از لزجت، b_x افت جریان در محیط‌های دارای خلل و فرج هستند.

مدل فرسایش و رسوب Flow-3D می‌تواند انتقال مواد بستر در اثر غلتش یا جهش و انتقال رسوبات معلق در جریان و غیره را محا سبه کند. در این مدل ر سوبات به دو صورت رسوبات متراکم و رسوبات معلق می‌تواند وجود دا شته با شند. ر سوبات معلق دارای غلظت پایین بوده و با سیال حرکت می‌کنند. رسوبات متراکم در محل تعریف‌شده توسط کاربر قرار می‌گیرند و در اثر تنش بر شی جریان در بستر شروع به حرکت می‌کنند. در این پژوهش با توجه به نوع رسوبات در آزمایشگاه، رسوب از نوع متراکم تعریف شد و به‌عنوان رسوب متراکم (Packed Sediment) در بالادست سرریز نوک اردکی قرار گرفت و تعریف شد.

مدل ریاضی Flow-3D با استفاده از تقریب حجمی بقای جرم و معادله انتقال رسوب پخش–انتقال میزان انتقال رسوبات بستر را برآورد می‌کند و با استفاده از روش حجم سیال ارتفاع سطح بستر در هر سلول محاسباتی را پیش‌بینی می‌کند. با فرض جریان دوفازی ذرات ر سوب در سیال و برقراری رابطهٔ مومنتوم در فاز پیوسته سیال رابطهٔ (٤) برقرار است:

$$\frac{\partial u_{drift}}{\partial t}+\bar{u}\nabla u_{drift}=\left(\frac{1}{\bar{\rho}}-\frac{1}{\rho_s}\right)\nabla P-\frac{K}{f_s\rho_s}u_r \qquad (٤)$$

در این رابطه، u_s سرعت ذرات رسوب، $\bar{u}$ سرعت متوسط حجمی سیال، K ضریب کششی بین ذرات رسوب و سیال، P نیروی فشار، u_r سرعت نسبی ذرات رسوب و سیال و u_{drift} سرعت شناوری ذرات رسوب است. تنش برشی سبب فرسایش و جابه‌جا شدن رسوبات در سطح بستر می‌گردد. این فرسایش تابعی از تنش برشی بحرانی و چگالی سیال و رسوب است [۲۰].

زمانی که نیروهای بی‌ثبات کننده مثل درگ، لیفت و شناوری بیش‌تر از نیروی پایدارکننده وزن ذرات باشد، انتقال ر سوب اتفاق می‌افتد. شیلدز (۱۹۳٦) پارامتری را برای بررسی پایداری ذرات بار بستر تعریف کرد که بعد ایشان این پارامتر به نام پارامتر شیلدز معرفی شد. در رابطهٔ (۵) معادله پارامتر شیلدز آورده شده است [21].

$$\tau_*=\frac{\tau_0}{\rho(s-1)gd_s} \qquad (۵)$$

که τ_* پارامتر شیلدز، d_s قطر ذرات، ρ چگالی سیال، g شتاب گرانش، s چگالی نسبی ذرات رسوب، τ_0 تنش برشی بستر است. اگر مقدار پارامتر شیلدز بیش‌تر از مقدار بحرانی آن باشد ذرات بار بستر انتقال می‌یابند. پارامتر شیلدز بحرانی با نماد τ_{*c} نشان داده می‌شود. با محاسبه پارامتر شیلدز و مقایسه با مقدار بحرانی آن می‌توان انتقال

و یا عدم حرکت ذرات بار بستر را موردبررسی قرار داد. برای شبیه‌سازی انتقال رسوبات تعریف مشخصات ذرات رسوب در بخش آبشویی رسوب به مدل ریاضی ضروری است. در نرم‌افزار Flow-3D ورژن ۱۱,۲، ۳ معادله میر–پیتر و مولر (۱۹٤۸)، نیلسن (۱۹۹۲) و ون راین (۱۹۸٤) برای تخمین انتقال بار بستر آورده شده است. در این پژوهش با انجام چند شبیه‌سازی نمونه با هر ۳ معادله و مقایسه نتایج با داده‌های آزمایشگاهی با توجه به دقت بیش‌تر معادله میر–پیتر و مولر [22] از این معادله استفاده شد. معادله میر–پیتر و مولر یکی از معروف‌ترین و بهترین معادلات تخمین انتقال رسوب در بستر کانال‌ها و رودخانه‌ها است که معادله آن در رابطهٔ (٦) آورده شده است:

$$\left(\frac{k}{k'}\right)^{\frac{3}{2}} \gamma RS = 0.047(\gamma_s - \gamma) D_m + 0.25\left(\frac{\gamma}{g}\right)^{\frac{1}{3}}\left(\frac{\gamma_s-\gamma}{\gamma_s}\right)^{\frac{2}{3}} q_b^{\frac{2}{3}} \quad (٦)$$

که در آن q_b بار بستر، D_m اندازه میانه ذرات، γ وزن مخصوص آب، γ_s وزن مخصوص ذره رسوب، R شعاع هیدرولیکی جریان، S شیب کف است. نسبت $\frac{k}{k'}$ از رابطهٔ (۷) به دست می‌آید.

$$\frac{k}{k'} = \left(\sqrt{\frac{f}{8}}\right)\left(\frac{V}{\sqrt{gRS}}\right) \quad (۷)$$

V سرعت متوسط جریان، f از دیاگرام مودی به دست می‌آید.

شرایط مرزی و شرایط اولیه

برای شرط مرزی ورودی دبی (Volume flow rate) (x=4.5 m) و در مقطع خروجی (x=6 m) از شرط مرزی جریان خروجی (Outflow)، دیواره‌ها و کف کانال شرط مرزی دیواره (Wall) و سطح آب شرط مرزی تقارن (Symmetry) استفاده شد. ابعاد سلول‌های محاسباتی شبکه‌بندی میدان حل برای شبیه‌سازی جریان مش یکنواخت با اندازه سلول ۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد. برای هر شبیه‌سازی تعداد سلول‌های محاسباتی در شبکه حل ۱٤٤۰۰۰۰ بود. در شکل (٤) استقلال شبکه حل از اندازه مش ارائه‌شده است. در مطالعه آزمایشگاهی برای جلوگیری از حرکت رسوبات با وارد شدن جریان به کانال علاوه بر بسته بودن هر ۳ دریچه، برقراری جریان در آغاز هر آزمایش از دبی‌های پایین و سپس افزایش تدریجی دبی تا رسیدن به دبی موردنظر انجام شد. انجام این کار باعث شده تا علاوه بر شسته نشدن رسوبات با وارد شدن جریان، الگوی رسوب‌گذاری شکل‌گرفته در بالادست سرریز تحت تأثیر دبی موردنظر باشد و ورود جریان به کانال روی الگوی رسوب‌گذاری شکل‌گرفته بی‌تأثیر باشد. در شبیه‌سازی برای جلوگیری از حرکت رسوبات با ورود جریان به فلوم در بخش شرایط اولیه مدل ریاضی، به‌اندازه‌ای که سیال روی رسوبات قرار گیرد، سیال ساکن تعریف شد. در جدول (۳) اندازه دانه‌بندی رسوبات مورداستفاده در تحقیق حاضر ارائه شده است.

جدول ۳ دانه‌بندی رسوبات مورداستفاده در تحقیق

درصد رسوبات (٪)	قطر ذرات (mm)
۹/۸۱	۳/۳۵
۳۰/۳۹	۲/۳٦
۲۲/٤٦	۲
۱۳/۱۹	۱/۷
۲٤/۱۳	۰/۷۱

ضریب آبگذری

برای محاسبه ضریب آبگذری، از رابطهٔ (۸) استفاده شده است:

$$C_d = \frac{\text{دبی واقعی}}{\text{دبی تئوری}} \quad (۸)$$

دبی واقعی، جریان ورودی به فلوم در هر آزمایش بوده و دبی تئوری از رابطهٔ زیر به دست می‌آید:

$$Q_T = Q_{g_1} + 2Q_{g_2} + Q_w + Q_d \quad (۹)$$

$$Q_{g_1} = C_{d_{g_1}} A_1 \sqrt{2gH_u} \quad (۱۰)$$

$$Q_{g_2} = C_{d_{g_2}} A_2 \sqrt{2gH_u} \quad (۱۱)$$

$$Q_w = C_{d_w} \frac{2}{3} \sqrt{2g}\, L_w H_w^{\frac{3}{2}} \quad (۱۲)$$

$$Q_d = C_{d_d} \frac{2}{3} \sqrt{2g} L_d H^{\frac{3}{2}} \quad (۱۳)$$

که C_{d_w}، L_w، H_w، C_{d_d}، L_d، H، $C_{d_{g_1}}$، A_1، $C_{d_{g_2}}$، A_2 و H_u، (H+P=Hu) به ترتیب ضریب آبگذری، طول سرریز و هد آب روی سرریز مرکب (سرریز لبه تیز در دماغه)، ضریب آبگذری، طول سرریز نوک اردکی و هد آب روی بال‌های جانبی سرریز، ضریب آبگذری و مساحت دریچه جلویی و دریچه‌ی جانبی و عمق آب بالادست می‌باشند.

با قرار دادن مقادیر آزمایشگاهی و محاسباتی با Flow-3D عمق آب بالادست، هد آب روی بال جانبی سرریز و هد آب روی دماغه، به ترتیب ضریب آبگذری آزمایشگاهی و محاسباتی با مدل ریاضی Flow-3D به دست می‌آید.

بررسی دقت نرم‌افزار در شبیه‌سازی الگوی رسوب‌گذاری

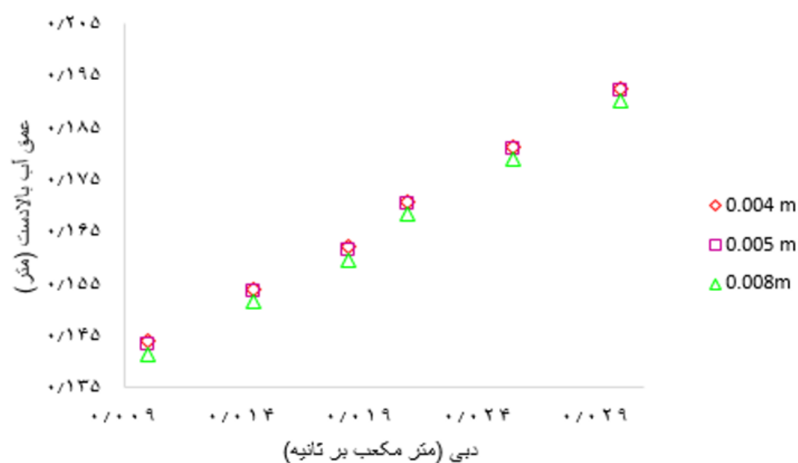
مقایسه میزان تفاوت الگوی رسوب‌گذاری شبیه‌سازی شده و آزمایشگاهی با روش پردازش تصویر در نرم‌افزار Matlab R2013a انجام شد. نرم‌افزار Matlab شناخته‌ترین نرم‌افزار در زمینه پردازش تصویر است که با نوشتن برنامه، قابل به انجام دستورات لازم جهت مقایسه تصویرها و میزان تفاوت آن‌ها است. در این روش ابتدا ابعاد دو تصویر از الگوی رسوب‌گذاری شبیه‌سازی شده و آزمایشگاهی برای شرایط موردبررسی (یک مدل و یک ارتفاع از صفحات و یک دبی خاص)، یکسان‌سازی ابعادی و سپس این دو عکس در نرم‌افزار Matlab فراخوانی شده و نهایتاً به کدهای باینری تبدیل شدند. ابعاد تصویرهای مورد پردازش در این تحقیق دارای عرض ۸۰۰ و ارتفاع ۱۰۰۰ پیکسل بودند. نرم‌افزار Matlab دو تصویر ورودی را تبدیل به ماتریسی با کد ۱ و ۰ کرده و نهایتاً با تطبیق دو ماتریس ۸۰۰۰۰۰ پیکسلی، تعداد پیکسل‌هایی که کدهای دو ماتریس با هم متفاوت‌اند به‌دست‌آمده و در آخر با استفاده از رابطهٔ (۱٤) اختلاف دو تصویر یا همان درصد خطا شبیه‌سازی الگوی رسوب‌گذاری به دست آمد.

$$\text{اختلاف دو تصویر}(\%) = \left(\frac{\text{تعداد پیکسل‌ها متفاوت}}{\text{تعداد کل پیکسل‌ها}}\right) \times 100 \quad (۱٤)$$

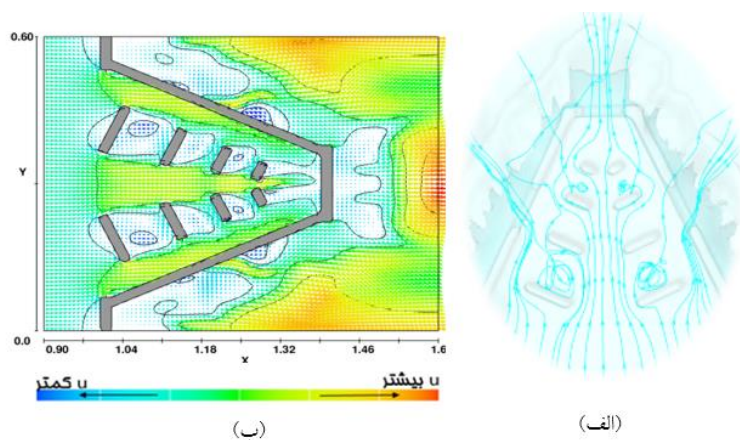
برای انجام واسنجی مدل از نتایج آزمایشگاهی پروفیل سطح آب در طول سرریز و همچنین پارامتر درصد خطای شبیه‌سازی الگوی رسوب‌گذاری استفاده شد. همچنین با انجام سعی و خطا مقادیر تنش برشی بحرانی بدون بعد (پارامتر شیلدز بحرانی)، ضریب جذب، نرخ انتقال بار بستر و ضریب درگ به ترتیب برابر ۰/۰۵، ۰/۰۱۸، ۸ و ۱/۵ در نظر گرفته شد. ابتدا شبیه‌سازی مدل A با ارتفاع صفحات ٤ سانتی‌متری انجام شد و نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد و از مقدار پارامترهایی که در این شبیه‌سازی به کار گرفته شده بود برای شبیه‌سازی سایر حالات استفاده شد.



شکل ۳ الگوی رسوب‌گذاری اولیه در بالادست سرریز نوک اردکی



شکل ٤ استقلال شبکه از اندازه مش: مدل A، $h_v = 0.04$ m



شکل ۵ الگوی جریان و خطوط هم‌تراز سرعت در سرریز: الف) الگوی جریان، ب) الگوی سرعت

نتایج و بحث

الگوی جریان و سرعت

در شکل (۵، الف) الگوی جریان شبیه‌سازی شده ارائه شده است. با توجه به این شکل مشخص است که خطوط جریانی که از بالادست به سمت پایین‌دست در حال حرکت‌اند به ۳ دسته تقسیم‌شده، یک دسته از خطوط جریان از مرکز کانال عبور کرده و مستقیم از دریچه در دماغه سرریز خارج می‌شوند، ۲ دسته دیگر خطوط جریان به صفحات یا مستغرق برخورد کرده و جریان چرخشی بین صفحات ایجادشده یا بدون برخورد به صفحات درنهایت از دریچه‌های جانبی خارج می‌شوند. خطوط جریان چرخشی بین صفحات بیانگر شکل‌گیری جریان‌های ثانویه و چرخشی در بین صفحات مستغرق است. در شکل (۵، ب) الگوی سرعت در بالادست سرریز نوک اردکی نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشخص است که در بین صفحات مستغرق سرعت طولی کاهش‌یافته که نشانگر وجود جریان‌های ثانویه در بین صفحات است. از طرفی بیش‌ترین مقدار سرعت در پای سرریز بوده که با ریزش جریان از روی دماغه سرریز ایجادشده است.

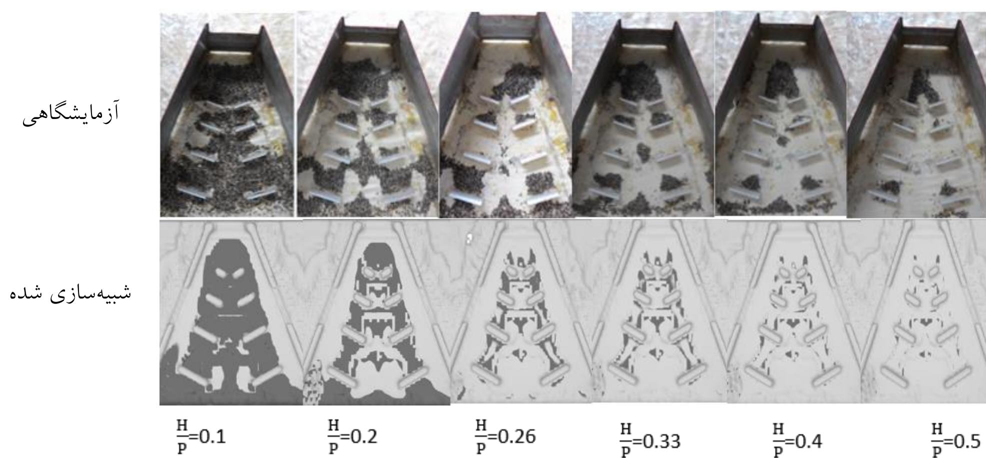
الگوی رسوب‌گذاری

شکل‌های (٦) الی (٩) الگوی رسوب‌گذاری آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده را در بالادست سرریز نوک اردکی

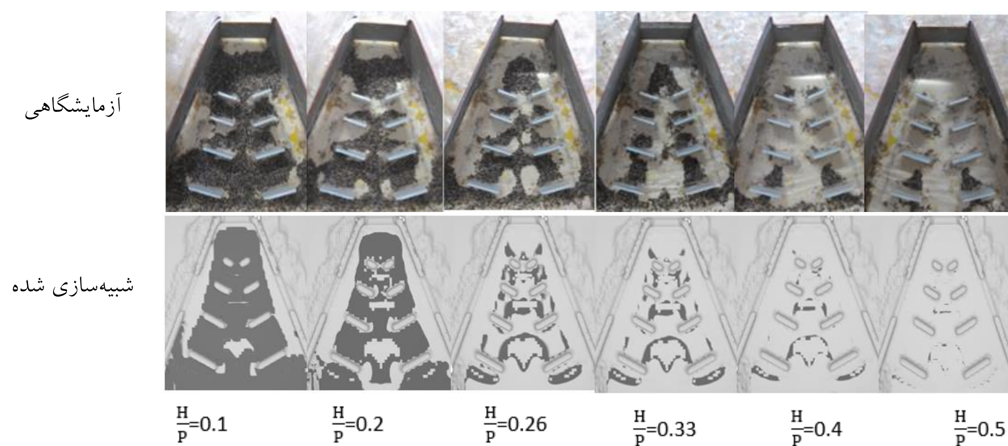
نشان داده است. در شکل (٦)، (۷)، (۸) و (۹) به ترتیب مربوط به الگوی رسوب‌گذاری برای حالتی که در بالادست سرریز صفحات مستغرق با ارتفاع ٤، ۷، ۱۰، ۱۳ سانتی‌متری به کار گرفته شده‌اند، است. با توجه به شکل (٦) مشخص است که در نسبت $\frac{H}{P} = 0.1$ تخلیه رسوبات فقط در محدوده دریچه شکل گرفته است. ولی با افزایش نسبت $\frac{H}{P}$ رسوبات بیش‌تری انتقال یافتند. به‌طوری‌که در نسبت $\frac{H}{P} = 0.4$ تقریباً بخش عمده‌ی رسوبات به پایین-دست سرریز منتقل شده است. با توجه به الگوی رسوب‌گذاری شبیه‌سازی نیز مشخص است که همین روند تغییرات در حالات شبیه‌سازی شده نیز قابل‌مشاهده است. شکل (۷) و (۸) روندی مشابه با شکل (٦) داشته-اند. تفاوت این دو شکل با شکل (٦) در این است که افزایش ارتفاع صفحات باعث انتقال رسوبات تجمع یافته در دماغه سرریز از نسبت $\frac{H}{P} = 0.4$ به $\frac{H}{P} = 0.33$ به ترتیب برای شکل (۷) و (۸) شده است. در شکل (۹) در نسبت $\frac{H}{P} = 0.1$ تقریباً نیمی از رسوبات و برای نسبت‌های بیشتر از $\frac{H}{P} = 0.2$ بخش عمده‌ی رسوبات به پایین‌دست منتقل شده است که نشان‌گر مؤثر بودن صفحات مستغرق ۰/۱۳ متری بر انتقال رسوبات است. از طرفی با توجه به این شکل‌ها مشخص است که نرم‌افزار Flow-3D به-خوبی توانسته الگوی رسوب‌گذاری را در این حالات شبیه‌سازی نماید.

در شکل (۱۰) نمونه‌ای از تبدیل تصاویر الگوی رسوب‌گذاری به تصاویر باینری نشان داده شده است که با تطبیق این دو تصویر درصد اختلاف و یا همان خطا شبیه‌سازی الگوی رسوب‌گذاری به دست آمد. در جدول (٤) حداکثر خطا شبیه‌سازی الگوی رسوب‌گذاری در نسبت‌های مختلف آورده شده است. با توجه به جدول (٤) مشخص است که خطا با افزایش نسبت $\frac{H}{P}$ ابتدا کمی افزایش و سپس کاهش‌یافته است. در نسبت $\frac{H}{P} = 0.1$ که آشفتگی جریان کم‌تر بوده و رسوبات محدوده دریچه‌ها فقط به پایین‌دست منتقل یافته‌اند، در الگوی شبیه‌سازی شده نیز همین اتفاق افتاده است. با زیاد شدن نسبت $\frac{H}{P}$ رسوبات به‌طور نامنظمی از بالادست سرریز تخلیه شده-اند که شباهت الگوی شبیه‌سازی شده به الگوی آزمایشگاهی نیز کاهش‌یافته ولی با افزایش بیش‌تر نسبت و خارج شدن بخش عمده‌ی رسوبات از بالادست سرریز شباهت دو تصویر به دلیل عدم وجود رسوبات در بالادست سرریز، افزایش‌یافته است. تغییر ارتفاع صفحات مستغرق بر درصد خطا این‌گونه بود که صفحات مستغرق با ارتفاع ۰/۱۳ متری کم‌ترین خطا را در شبیه‌سازی الگوی رسوب‌گذاری داشته‌اند. علت این امر نیز آن است که در حالت به‌کارگیری صفحات ۰/۱۳ متری در ٤ نسبت از $\frac{H}{P}$ بخش عمده‌ی رسوبات در دو حالت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده تخلیه شدند و باعث کاهش اختلاف دو تصویر و درنهایت کاهش درصد خطا شبیه‌سازی الگوی رسوب‌گذاری شده است.

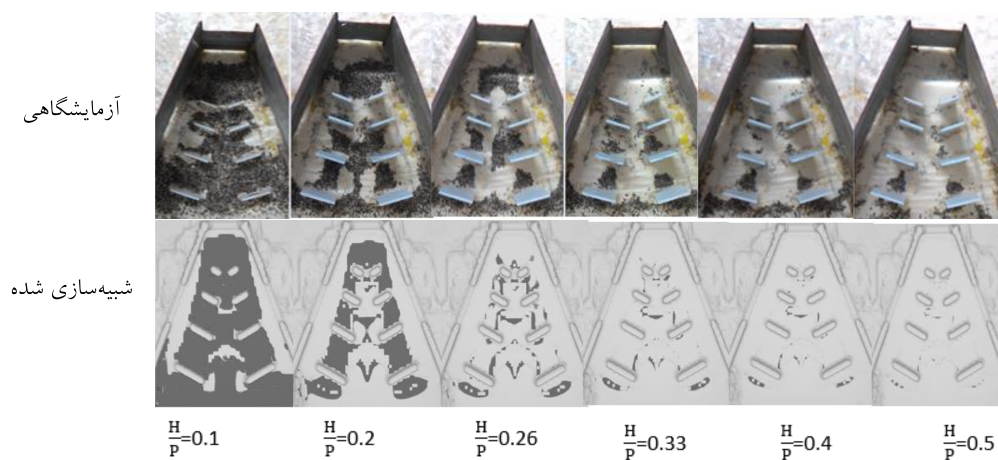
نکته مهم در شکل‌های (٦) تا (۹)، مقیاس زمانی و مدت‌زمان شبیه‌سازی و تحقیق آزمایشگاهی است. در زمان بهره‌برداری، قطع و وصل‌های متعدد جریان در شبکه آبیاری، در کارایی صفحات اثرگذار است. مشاهدات نشان داد که عملکرد صفحات مستغرق به حدی بالا بود که در مدت‌زمان کوتاهی پس از شروع آزمایش حدود ۵ دقیقه قسمت عمده‌ای رسوبات از بالادست سرریز به پایین‌دست منتقل می‌شدند و هر چه ارتفاع صفحات مستغرق و میزان هد آب بالادست سرریز افزایش می‌یافت، زمان انتقال رسوبات کوتاه‌تر می‌شد. قسمت عمده‌ای از رسوبات در همان ابتدای بهره‌برداری تخلیه می‌شد، به نظر می‌رسد قطع و وصل‌های جریان در زمان بهره‌برداری تأثیر چندانی بر عملکرد این صفحات نداشته باشد. شایان‌ذکر است با انجام آنالیز ابعادی می‌توان مقیاس زمانی بین مدل و اصل را تعیین کرد.



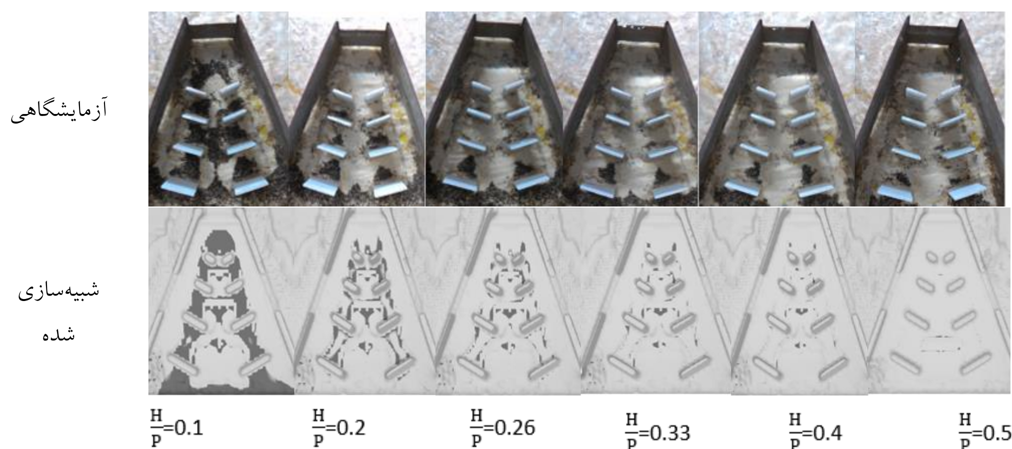
شکل ٦ الگوی رسوب‌گذاری در بالادست سرریز نوک اردکی: $h_v = 0.04$ m



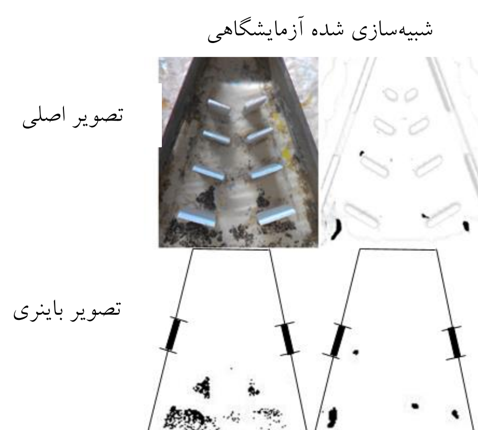
شکل ۷ الگوی رسوب‌گذاری در بالادست سرریز نوک اردکی: $h_v = 0.07$ m



شکل ۸ الگوی رسوب‌گذاری در بالادست سرریز نوک اردکی: $h_v = 0.1$ m



شکل ۹ الگوی رسوب‌گذاری در بالادست سرریز نوک اردکی: $h_v = 0.13$ m



شکل ۱۰ پردازش تصویر الگوی رسوب‌گذاری برای دو حالت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده جدول (٤) خطای شبیه‌سازی الگوی رسوب‌گذاری

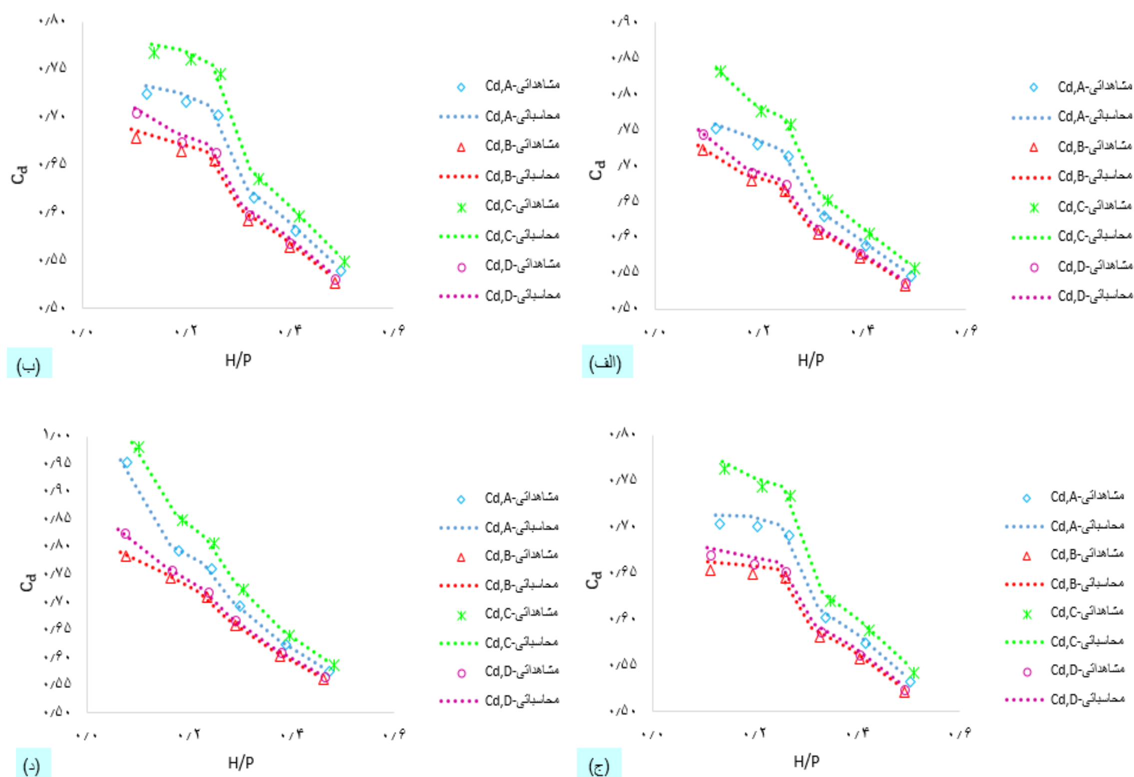
جدول ٤ خطای شبیه‌سازی الگوی رسوب‌گذاری

$\frac{H}{P}$	۰/۱	۰/۲	۰/۲٦	۰/۳۳	۰/٤	۰/۵
حداکثر خطا (٪)	۹/۵	۱۴/۴	۱۲	۱۲/۵	۱۰/۷	۵/۸

ضریب آبگذری

در شکل (۱۱) ضریب آبگذری برای مدل ترکیبی سرریز–دریچه نوک اردکی برای صفحات ۰/۰٤، ۰/۰۷، ۰/۱ و ۰/۱۳ متری به ترتیب در بخش (الف) تا (د) آورده شده است. با توجه به این شکل مشخص است که با افزایش نسبت $\frac{H}{P}$ ضریب آبگذری به دلیل افزایش افت انرژی، کاهش‌یافته است. برای نسبت $\frac{H}{P}$ کم‌تر از ۰/۲ روند این تغییرات شیب کمی داشته است ولی برای مقادیر $\frac{H}{P}$ بیش‌تر از ۰/۲ شیب این روند افزایش‌یافته است. از طرفی با افزایش نسبت $\frac{H}{P}$ تفاوت مدل‌ها در مقدار ضریب آبگذری کاهش‌یافته است ولی برای مقادیر کم‌تر از ۰/۲ بین ضریب آبگذری مدل‌ها تفاوت قابل‌توجهی وجود دارد. در بین مدل‌ها ضریب آبگذری مدل C با کم‌ترین مساحت دریچه جانبی، بیش‌تر از سایر مدل‌ها است و هر چه

مساحت دریچه جانبی بیش‌تر شده، ضریب آبگذری کاهش‌یافته است. دلیل این امر، افزایش افت انرژی با افزایش مساحت بازشدگی دریچه جانبی و از طرفی با توجه به رابطهٔ ضریب آبگذری، مخرج کسر این رابطه بیش‌تر شده و نهایتاً موجب کاهش ضریب آبگذری شده است. با توجه به شکل (۱۱) و مقایسه بین اندازه‌های مختلف h_v مشخص است که برای $h_v = 0.07\ m$ و $h_v = 0.1\ m$ ضریب آبگذری نسبت به $h_v = 0.04\ m$ کاهش‌یافته است. دلیل این امر آن است که صفحات مستغرق با ارتفاع ۰/۰۷ و ۰/۱ متری مانعی در مسیر جریان قرار دارند و باعث افزایش افت انرژی و بالا آمدن عمق آب بالادست سرریز شده و درنتیجه ضریب آبگذری کاهش‌یافته است. برای صفحات ۰/۱۳ متری که هم‌ارتفاع سرریزند، جریانی که از بالادست به سمت پایین‌دست حرکت کرده، به صفحات مستغرق برخورد کرده و با توجه به عمود بودن صفحات مستغرق بر بال-های جانبی سرریز، باعث شده که خطوط جریان ریزشی عمود بر بال‌های جانبی سرریز شود و عملکرد سرریز افزایش‌یافته و درنتیجه ضریب آبگذری نسبت به صفحات ۰/۰٤ متری افزایش یابد. حداکثر و حداقل افزایش ضریب آبگذری برای صفحات ۰/۱۳ متری نسبت به صفحات ۰/۰٤ متری، به ترتیب برای مدل C در نسبت $\frac{H}{P} = 0.1$، ۱۵ درصد و برای مدل B در نسبت $\frac{H}{P} = 0.5$، ۳ درصد است. به‌طور میانگین برای تمامی مدل‌ها و در شرایط هیدرولیکی مختلف ٦ درصد ضریب آبگذری نسبت به صفحات ۰/۰٤ متری افزایش پیدا کرده است. همچنین طبق بخش‌های مختلف شکل (۱۱) مشخص است که مدل ریاضی Flow-3D توانسته به‌خوبی ضریب آبگذری سرریز نوک اردکی را شبیه‌سازی نماید. در جدول (۵) حداکثر خطای نسبی محاسبه ضریب آبگذری ارائه‌شده است. خطای محاسبه ضریب آبگذری با توجه به رابطهٔ ضریب آبگذری به خطای محاسبه عمق آب توسط مدل Flow-3D وابسته است.



شکل ۱۱ ضریب آبگذری سرریز نوک اردکی: الف؛ $h_v = 0.04\ m$، ب؛ $h_v = 0.07\ m$، ج؛ $h_v = 0.1\ m$، د؛ $h_v = 0.13\ m$.

جدول ٥ خطای نسبی محاسبه ضریب آبگذری سرریز نوک اردکی

$\frac{H}{P}$	٠/١	٠/٢	٠/٢٦	٠/٣٣	٠/٤	٠/٥
حداکثر خطای نسبی (٪)	١/٥	١/٥	١/٥	١/٧	١/٨	١/٩

کبیری‌سامانی (٢٠١٠) نتیجه‌گیری کرد که به‌کارگیری صفحات مستغرق در بالادست سرریزهای مورب موجب افزایش ٣٣ درصدی ضریب آبگذری شده، در این تحقیق نیز به‌کارگیری صفحات مستغرق هم‌ارتفاع سرریز، موجب افزایش ٦ درصدی ضریب آبگذری شده است. شفاعت‌طلب و همکاران (١٣٩٥) نتیجه‌گیری کردند که ترازهای رسوب‌گذاری ٣٠ و ٦٠ درصد ارتفاع سرریز، تأثیر معنی‌داری بر عملکرد سرریزهای کنگره‌ای ندارد. در این تحقیق نیز با توجه به ارتفاع کم رسوبات، رسوبات بالادست سرریز تاثیرچندانی بر عملکرد و ضریب آبگذری سرریز نداشت.

نتیجه‌گیری

وجود صفحات مستغرق باعث به وجود آمدن جریان‌های چرخشی در بین صفحات مستغرق شده و از طرفی با عمود بودن این صفحات به بال‌های جانبی سرریز، رسوبات را به سمت دریچه‌های جانبی منتقل می‌کند. هر چه ارتفاع صفحات و نسبت $\frac{H}{P}$ افزایش یابد، رسوبات بیش‌تری به پایین‌دست منتقل می‌شوند.

با افزایش هد آب بالادست سرریز، ضریب آبگذری به دلیل افزایش افت انرژی کاهش می‌یابد. در بین مدل‌ها مدل C با کم‌ترین مساحت بازشدگی دریچه‌ی جانبی ضریب آبگذری بیش‌تری از سایر مدل‌ها دارد. هر چه بازشدگی دریچه‌ی جانبی بیش‌تر باشد به دلیل افزایش افت انرژی ضریب آبگذری کاهش می‌یابد. ضریب آبگذری مدل C، در حالت به‌کارگیری صفحات ٠/١٣ سانتی‌متری، به ترتیب به‌طور متوسط ٦/٥ درصد بیش‌تر از سایر مدل‌هاست.

به‌کارگیری صفحات مستغرق هم‌ارتفاع سرریز (٠/١٣ متری) باعث عمود شدن خطوط جریان بر بال‌های جانبی سرریز و نهایتاً موجب افزایش ٦ درصدی ضریب آبگذری شده است و این صفحات علاوه بر نسبت‌های بالا $\frac{H}{P}$ در نسبت‌های $\frac{H}{P}$ کم نیز برای انتقال رسوبات عملکرد خوبی داشته که به‌کارگیری این صفحات را برای انتقال رسوبات توجیه می‌کند. به‌کارگیری صفحات مستغرق با نسبت $\frac{h_v}{P} = 1$ و $\frac{h_v}{P} = 0.3$ بر ضریب آبگذری اثر مثبتی داشته و بی‌اثر بوده ولی به‌کارگیری صفحات با نسبت $1 > \frac{h_v}{P} > 0.3$ توصیه نمی‌شود.

با افزایش ارتفاع صفحات مستغرق تأثیر نوع مدل بر انتقال رسوبات ناچیز است و با توجه به اینکه مدل C ضریب آبگذری بیش‌تری نسبت به سایر مدل‌ها دارد می‌توان این مدل با به‌کارگیری صفحات هم‌ارتفاع سرریز را به‌عنوان مدل بهینه معرفی نمود.

مدل ریاضی Flow-3D با تعریف شرایط حل مناسب می‌تواند به‌خوبی ضریب آبگذری سرریز و با تقریب نسبتاً مناسبی الگوی رسوب‌گذاری در بالادست سرریز نوک اردکی را شبیه‌سازی نماید. حداکثر خطای نسبی در محاسبه الگوی رسوب‌گذاری و ضریب آبگذری به ترتیب ١٤/٤ و ١/٩ درصد است.

مراجع

1. Crookston, B.M., “Labyrinth weirs.” Ph.D. thesis, Utah State University, Logan, UT. (2010).
2. Shaghaghian, M. and Sharifi, M, "Numerical Modeling of Sharp- Crested Triangular Plan Form Weirs Using FLUENT". *Indian Journal of Science and Technology*, Vol.8, No.34, (2015).

3. Bilhan, O., Emiroglu, M.E., and Miller, C. J., "Experimental Investigation of Discharge Capacity of Labyrinth Weirs with and without Nappe Breakers", *World Journal of Mechanics,* Vol. 6, pp. 207-221, (2016).
4. Bilhan, O., Aydin, M.C., Emiroglu, M.E., and Miller, C.J. "Experimental and CFD analysis of circular labyrinth weirs", *Journal Irrigation and Drainage Engineering,* Vol.144 No.6 pp. 207-221, (2018).
5. Tajari, M., Dehghani, A.A., and Meftah halaghi, M., "Semi-analytical solution and numerical simulation of water surface profile along duckbill weir". *ISH Journal of Hydraulic Engineering,* (2018).

۶. اژدری مقدم، م، جعفری ندوشن ث، «طراحی هیدرولیکی سرریزهای کنگره‌ای ذوزنقه‌ای با استفاده از هیدرودینامیک محاسباتی» مجله علمی-پژوهشی عمران مدرس، ۱۳(۲): ۱۳۳-۱۲۳، (۱۳۹۲).

۷. ساکت، م، «تعیین ضریب دبی سرریزهای نوک اردکی لبه‌تیز مرکب»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب‌وخاک دانشگاه علوم کشاورزی گرگان، (۱۳۹٤).

۸. شفاعت‌طلب، ح، اسمعیلی‌ورکی، م، اشرف‌زاده، ا، «مطالعه آزمایشگاهی تأثیر تراز پایاب بر ضریب دبی جریان در سرریزهای کنگره‌ای با پلان ذوزنقه‌ای»، تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی، ۱۷(٦۷): ۸۰-٦۳، (۱۳۹۵).

۹. پورنعمت اللهی، ن.، اسمعیلی‌ورکی، م.، ملک‌پور، ا. «مطالعه آزمایشگاهی تأثیر توأم زبری و رسوب‌گذاری بر عملکرد هیدرولیکی سرریزهای استوانه‌ای در شرایط جریان آزاد». تحقیقات ایران، ٤۸ (۵): ۱۱۲۱-۱۱۳۲، (۱۳۹٦).

۱۰. بهره‌بر، ا.ر.، آذرپیوند، ح.، پرویزیان گنجه، ف.، جهانتاب، ف.، «تأثیر بالا آمدن بستر بالادست سرریز اوجی به‌جای رسوبات بر نیمرخ سطح آب و ضریب دبی جریان»، اولین همایش سراسری کشاورزی و منابع طبیعی پایدار، (۱۳۹۲).

۱۱. دستورانی، م.، نصرانی، م.، «اثر ته‌نشینی رسوبات در پشت سرریز اوجی بر شرایط جریان»، مجله پژوهش آب ایران، ٦(۱۰)، (۱۳۹۱).

۱۲. داود مقامی، د.، بانژاد، ح.، صانعی، م.، محسنی موحد، ا.، «بررسی تأثیر رقوم بستر بالادست و پایین‌دست روی ضریب آبگذری سرریز نوک اردکی لبه تیز، نشریه علمی-پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز»، ۹(٤): ٤۱۳-٤۲۵. (۱۳۹٦).

13. Ogden, F.L., Creel, J.N., Kempema, E.W., Crouch, T.D., "Sedimentation Effects on Triangular Short-Crested Flow-Measurement Weirs", *Journal Hydrology Engineering*, Vol.22, No.8, (2017).
14. Odgaard, A.J. and Kennedy, J.F., "River- bend bank protection by submerged vanes", *Journal of Hydraulic Engineering,* Vol. 109, No.8, pp. 1161–1173. (1983).
15. Odgaard, A.J. and, Lee HYE, "Submerged vanes for flow control and bank protection in streams", University of Iowa, Iowa, (1984).
16. Kabiri-Samani A.R., "Analytical approach for flow over an oblique weir". *Journal of Civil Engineering,* Vol. 17, No. 2, pp. 107-117, (2010).
17. Beygipoor, Gh., Shafaei Bajestan, M., Kaskuli, H.A. and, Nazari, S., "The Effect of Distance from Submerged Vanes to the Intake at Different Angles of Vanes on Controlling the Sediment Entering the Intake Branching from a 90° Convergent Bend", *International Journal of Farming and Allied Sciences,* Vol.2, No.17, pp. 591-598, (2013).
18. Masloum-Sahraki, S., Mahmoudian, Sh. and Masloum, R, "Effect of Submerged Vanes on Intake Ratio and Water Surface profile at 55° Diversion", *Journal of river engineering,* Vol. 2, No.2, pp. 1-4. (2014).

۱۹. منتصری، ح، توکلی، ک، «مطالعه عددی روی جانمایی تک صفحه مستغرق نسبت به لبه‌های آبگیر جانبی در کانال قوسی U شکل»، مجله

عمران مدرس، ۱۵(۲): ۱۸۱-۱۷۱، (۱۳۹٤).

۲۰. اسدی، م، زمردیان، م.ع، «شبیه سازی عددی الگوی جریان متلاطم و آب شستگی موضعی بستر در اطراف آب‌شکن قائم و زاویه‌دار با مدل Flow-3D»، مجله علوم و مهندسی آبیاری، ۳۹(۲): ۱۷۹-۱٦۷، (۱۳۹۵).

21. Chanson, H, "The hydraulic of open channel flow", Department of Civil Engineering, The University of Queensland, Australia. (2004).

22. Meyer Peter, E. and, R. Muller, "Formulas for bed load transport", Hydraulic Engineering Reports, Stockholm. (1948).